

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра "Процеси та обладнання хімічних  
і нафтопереробних виробництв"

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
**зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"**  
**освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг**  
**обладнання хімічних виробництв"**

Тема роботи: Ректифікаційна установка. Розробити  
кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для  
випаровування бензолу

Виконала:  
студентка групи ХМз-53-7с  
Сербіновська Лариса Володимирівна

\_\_\_\_\_  
підпис

Залікова книжка  
№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Юхименко Микола Петрович

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**Кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв**

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"  
Освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг обладнання хімічних виробництв"

Курс 3      Група ХМз-53-7с      Семестр 6

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студентка Сербіновська Лариса Володимирівна

1 Тема проекту: Ректифікаційна установка. Розробити кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для випаровування бензолу

2 Вихідні дані: Розробити кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для випаровування бензолу у кількості 3000 кг/год. під тиском 1,25 ат. У якості гарячого теплоносія використовується насичена водяна пара під абсолютним тиском 1,4 ат.

3 Перелік обов'язкового графічного матеріалу (аркуші А1):

- |  |            |
|--|------------|
| 1. <u>Технологічна схема ректифікаційної установки</u> | – 0,5 арк. |
| 2. <u>Складальне креслення апарату</u>                 | – 1,0 арк. |
| 3. <u>Складальні креслення вузлів</u>                  | – 1,5 арк. |

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.; 2. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

Етапи та розділи проектування	ТИЖНІ				
	1	2,3	4,5	6,7	8
1 Вступна частина	x				
2 Технологічна частина		xx			
3 Проектно-конструкторська частина			xx		
4 Розробка креслень				xx	
5 Оформлення записки					x
6 Захист роботи					x

6 Дата видачі завдання

жовтень 2019 р.

Керівник

\_\_\_\_\_  
підпис

доцент Юхименко М.П.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 47 с., 7 рис., 2 табл., 1 додаток, 18 джерел.

Графічні матеріали: технологічна схема ректифікаційної установки, складальне креслення апарата, складальні креслення вузлів – усього 3 аркуші формату А1.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра «Ректифікаційна установка. Розробити кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для випаровування бензолу».

Наведено теоретичні основи та особливості процесу теплообміну у виробництві бензолу, виконані технологічні розрахунки апарата, визначені його габаритні розміри, гідравлічний опір, обґрунтований вибір матеріалу для виготовлення апарата, розраховане і вибране допоміжне обладнання. Розрахунками на міцність і герметичність показана надійність роботи спроектованого апарата. У розділі «Охорона праці» розглянуто теоретичне питання: Навчання працівників безпечних способів праці. Зміст та види інструктажів, хто і коли їх проводить.

Ключові слова: УСТАНОВКА, ПАРОВИЙ ПРОСТІР, КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК, БЕНЗОЛ, РОЗРАХУНОК, МОНТАЖ, РЕМОНТ, БЕЗПЕКА.

## Зміст

C.

Вступ	5
1 Технологічна частина	7
1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки	7
1.2 Теоретичні основи процесу	8
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів	13
2 Технологічні розрахунки процесу і апарата	17
2.1 Технологічні розрахунки	17
2.2 Конструктивні розрахунки	20
2.3 Гідравлічний опір апарата	22
2.4 Вибір допоміжного обладнання	24
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	29
3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки	29
3.2 Розрахунок опори апарата	32
4 Монтаж та ремонт апарата	36
4.1 Монтаж розробленого апарата	36
4.2 Ремонт апарата	37
5 Охорона праці	41
Список літератури	46
Додаток – Специфікації	

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ						
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Теплообмінник з паровим простором Пояснювальна записка			Лім.	Лист	Листів	
Розроб.	Сербіновська										
Перевір.	Юхименко									4	47
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.	Склабінський										
					СумДУ, ХМЗ-53-7с						

## Вступ

Теплообмінним називають обладнання, у якому проходять процеси обміну теплотою між двома теплоносіями. За цільовим технологічним призначенням розрізняють такі рекуперативні теплообмінники [1]:

- власне теплообмінники;
- підігрівники;
- холодильники;
- охолоджувачі-конденсатори;
- конденсатори;
- випарники;
- випарники-конденсатори та ін.

Теплообмінники-випарники кожухотрубного типу застосовують у холодильних установках для випаровування низькокиплячих холодоагентів при охолодженні нагрітих робочих середовищ до низьких температур, а також у ректифікаційних та десорбційних установках у якості парогенеруючого обладнання для обігрівання нижньої частини колони потоками пари киплячого компонента [1].

Стандартом регламентоване виготовлення апаратів двох різновидів [1]:

- з конічним або еліптичним днищем та компенсацією температурних подовжень застосуванням U-подібних трубок;
- з конічним або еліптичним днищем та компенсацією температурних подовжень застосуванням плаваючої голівки.

Кожухотрубні горизонтальні випарники із плаваючою голівкою типу ВП виготовляють із діаметром корпуса 800–1600 мм при одному трубному пучку із площею поверхні теплообміну 38–170 м<sup>2</sup>, при застосуванні двох або трьох трубних пучків діаметр корпуса становить 2400–2800 мм, загальна площа поверхні теплообміну становить 192–340 м<sup>2</sup>. Для випаровування технологічних середовищ під тиском 1–2,5 МПа, що працюють у діапазоні температур мінус 40–60°С, у холодильних установках загальнопромислового призначення застосовують кожухотрубні горизонтальні випарники типу ВТ-11. У них об'єм парового простору значно зменшений, але передбачений сухопарник, який відокремлює краплі рідини

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

та виключає попадання їх в усмоктувальну лінію компресора. Такі випарники виготовляють із діаметром корпусу 400–2000 мм при довжині труб 3000–6000 мм, числі ходів у трубному просторі 2–8 [1].

У якості гарячого теплоносія, що подається у трубний простір, може бути використана насичена водяна пара, нагріті нафтопродукти або гарячі гази у залежності від температурного режиму роботи.

У даній кваліфікаційній роботі проектуємо випарник із плаваючою голівкою (типу ВП) для випаровування частини кубового залишку (бензолу) ректифікаційної колони.

Зміст розділів у даній пояснювальній записці формувався відповідно вимогам [2].

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

## 1 Технологічна частина

### 1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки

Ректифікаційна установка являє собою комплекс машин і апаратів, використовуваних для поділу двох- і більше компонентних речовин на окремі компоненти або їх групи (фракції). Принципова схема безперервно діючої ректифікаційної установки приведена на рис. 1.

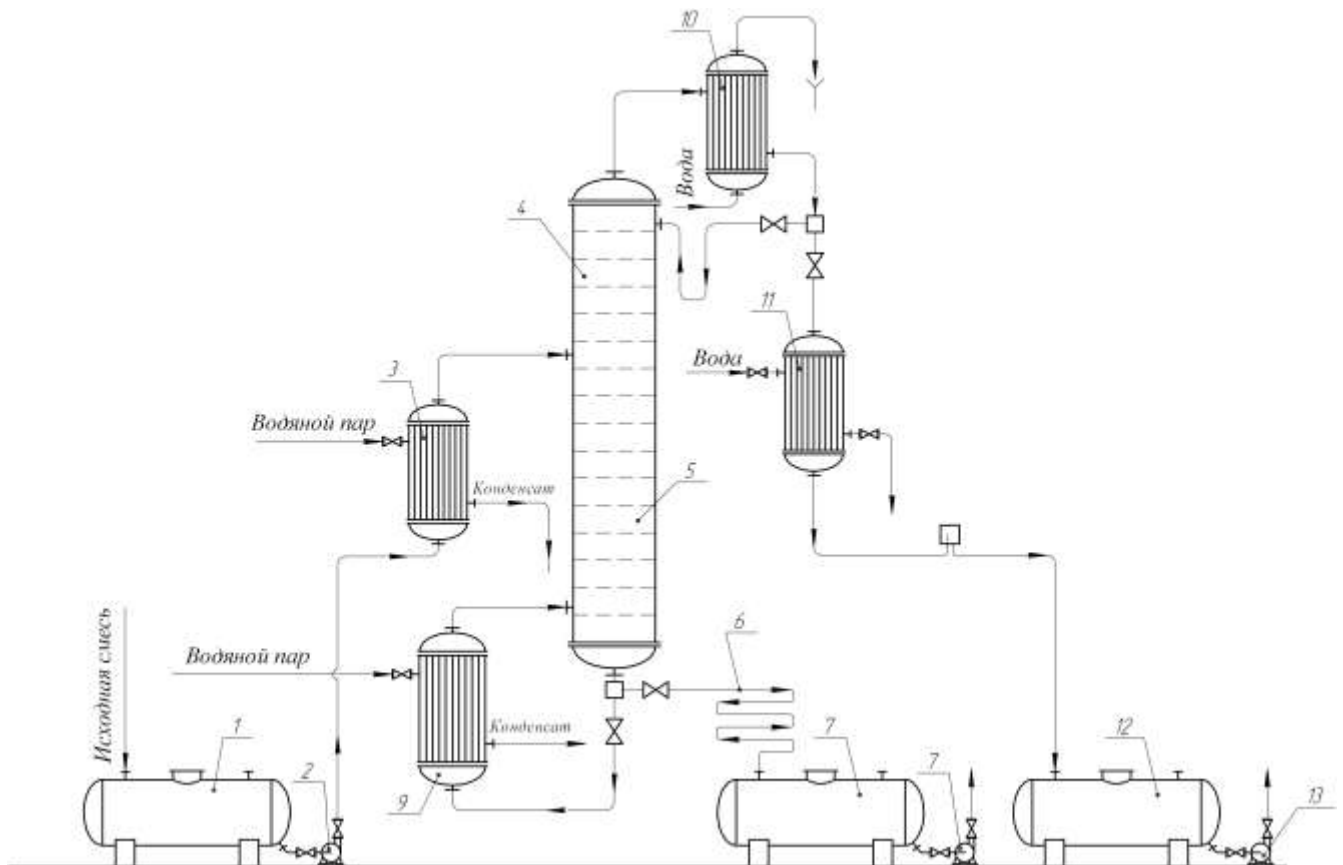


Рисунок 1 – Принципова схема ректифікаційної установки:

1, 7, 12 – збірники-сховища; 2, 8, 13 – відцентрові насоси; 3 – підігрівач вихідної суміші; 4, 5 – верхня і нижня частини ректифікаційної колони; 6, 11 – холодильники; 9 – випарник; 10 – дефлегматор

Вихідний розчин зі збірника-сховища 1 відцентровим насосом 2 подається в теплообмінник 3, де підігрівається до температури кипіння потоком гріючої пари, що конденсується у міжтрубному просторі теплообмінника. Нагрітий розчин надходить на тарілку живлення ректифікаційної колони, яка складається із верхньої 4 (зміцнюючої) частини і нижньої 5 (вичерпної) частини. На тарілці живлення склад

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

рідини відповідає складу вихідної суміші. У результаті поділу суміші з нижньої частини колони відводиться кубовий залишок (у нашому випадку – це бензол), який охолоджується водою в теплообміннику 6 і відводиться у збірник 7, звідки насосом 8 відкачується споживачеві. Частина кубового залишку відбирається з нижньої частини колони і виходить у випарник 9, у якому за рахунок тепла насиченої водяної пари, що подається в трубний простір апарата, відбувається вскипання кубової рідини і утворення пари високо киплячого компонента (ВКК). Останній повертається у колону, під нижню її тарілку, у якості парового зрошення. Таким чином, у нижній частині ректифікаційної колони відбувається процес відгону (вичерпання) ВКК зі стікаючого вниз рідкого розчину.

У верхній частині колони відбувається процес збагачення (зміцнення) пари низько киплячим компонентом (НКК) за рахунок багатоступеневого контактування на масообмінних тарілках зі стікаючою зверху вниз флегмою. Пара, яка відводиться з верхньої частини колони, надходить у дефлегматор 10, де конденсуються в міжтрубному просторі теплообмінника за рахунок відведення тепла холодоагенту, що рухається у трубному просторі. Частина отриманого конденсату відбирається і у вигляді флегми повертається в колону на зрошення верхньої її частини. Інша частина (дистиллят) додатково охолоджується в холодильнику 11 і направляється в збірник 12 у якості готового продукту з високою концентрацією НКК.

## 1.2 Теоретичні основи процесу

Теоретичні основи процесу теплообміну, які представлені у даному підрозділі, виконано на підставі аналізу літературних джерел [3–6].

У **випарниках** основним завданням процесу є випаровування робочого середовища (холодного теплоносія) і переведення його з рідкого стану в паровий (або газовий) стан за рахунок передачі тепла від гарячого теплоносія до холодного, що кипить та випаровується.

У **випарниках-конденсаторах** по обидві сторони поверхні теплопередачі теплоносії змінюють свій агрегатний стан – у той час як гарячий теплоносіє віддає тепло та конденсується, холодний теплоносіє, по іншу сторону поверхні, нагрівається та випаровується.

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>8</b>
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



**У залежності від агрегатного стану теплоносіїв розрізняють такі теплообмінні апарати:**

- без зміни агрегатного стану обох теплоносіїв (газо-газові, газо-рідинні, рідинно-рідинні холодильники та підігрівачі);
- зі зміною агрегатного стану одного з теплоносіїв (підігрівник-випарник, конденсатор-підігрівник, холодильник-конденсатор тощо);
- зі зміною агрегатного стану обох теплоносіїв (конденсатор-випарник).

**За способом утворення теплообмінної поверхні розрізняють:**

- апарати, що виготовлені із труб (трубні, кожухотрубні, змійовикові, кручені та ін.);
- теплообмінні апарати, що виготовлені з листового прокату (пластинчасті, спіральні, ламельні та ін.).

**За орієнтацією теплообмінної поверхні розрізняють:**

- вертикальні (В);
- горизонтальні (Г);
- похилі (П).

**За способом компенсації температурних подовжень теплообмінні апарати бувають:**

- без компенсації – жорсткої конструкції;
- з компенсацією пружним елементом – напівжорсткої конструкції;
- з компенсацією в результаті вільних подовжень – нежорсткої конструкції.

**Наявність конструктивних пристроїв для компенсації температурних подовжень відбито в умовних позначеннях типу теплообмінника такими індексами:**

- ВУ – випарник з U-подібними трубками;
- ТН – теплообмінник з нерухомими трубними дошками;
- ТП – теплообмінник із плаваючою голівкою;
- ХК – холодильник з температурним компенсатором на корпусі.

Окремі види теплообмінників мають додаткові класифікаційні ознаки.

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Вибір теплообмінника здійснюється за площею поверхні теплопередачі, яка розраховується за формулою:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{CP}}, \quad (1)$$

де  $Q$  – тепловий потік в апараті, Вт;

$K$  – загальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Delta t_{CP}$  – середня різниця температур між теплоносіями, °С.

Коефіцієнт теплопередачі для плоскої стінки або при великому радіусі її кривизни ( $d_B / d_H > 0,5$ ) складе:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі теплоносіїв, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{CT}$  – товщина стінки теплопередаючої поверхні, м;

$\lambda_{CT}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·К).

Орієнтовні значення коефіцієнтів теплопередачі наведені в табл. 6.2 [7], а коефіцієнтів тепловіддачі – в табл. 6.3 [7].

Середня різниця температур при прямотоці або протитоці теплоносіїв дорівнює:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}, \quad (3)$$

де  $\Delta t_B$  і  $\Delta t_M$  – різниці температур (великої й малої) теплоносіїв на кінцях теплообмінника.

Середня температура теплоносія, за якою визначаються його теплофізичні властивості, знаходиться двома способами. Для теплоносіїв, температури яких

змінюються від початкової  $t_1$  до кінцевої  $t_2$  і  $t_2/t_1 < 2$ , приймають середньоарифметичну температуру  $t_{CP} = (t_1 + t_2)/2$ .

Для теплоносія, у якого  $t_2/t_1 > 2$  середню температуру розраховують за формулою:

$$t_{CP} = \theta_{CP} \pm \Delta t_{CP}. \quad (4)$$

Основні критерії подібності, які застосовуються у розрахунках процесів конвективного теплообміну при вимушеному русі теплоносіїв, наведені нижче [4].

Критерій Нуссельта характеризує теплообмін між теплоносієм і стінкою

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}; \quad (5)$$

Критерій Рейнольдса характеризує гідродинамічний режим руху теплоносія

$$Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu}; \quad (6)$$

Критерій Прандтля характеризує теплофізичні властивості теплоносія

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}; \quad (7)$$

Критерій Грасгофа характеризує режим руху теплоносія при вільній конвекції

$$Gr = \frac{l^3 \cdot g \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta \theta}{\mu^2}. \quad (8)$$

У рівняннях (5) – (8) такі позначення:

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda$  – теплопровідність теплоносія, Вт/(м·К);

$\mu$  – динамічна в'язкість теплоносія, Па·с;

$c$  – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·К);

$\rho$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення теплоносія,  $1/K$ ;

$w$  – швидкість теплоносія,  $m/c$ ;

$l$  – визначальний геометричний розмір,  $m$ ;

$g$  – прискорення сили тяжіння,  $m/c^2$ ;

$\Delta\theta$  – частковий температурний напір (різниця між температурою гарячого теплоносія і температурою стінки або між температурою стінки і температурою холодного теплоносія),  $K$ .

Під час вимушеної конвекції теплоносії рухаються уздовж поверхні теплообміну з певною швидкістю під дією зовнішньої сили, наприклад, сили тяжіння або сили тиску, що розвивається насосом, компресором або вентилятором.

Критерії  $Re$ ,  $Pr$  і  $Gr$  є визначеними, а критерій  $Nu$  – невизначеним (тобто залежить від інших критеріїв подібності).

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі при течії рідини в прямих трубах рекомендуються [4] наступні критеріальні рівняння:

– для ламінарного режиму  $Nu_z = 0,74 \cdot (Re_z \cdot Pr_z)^{0,2} \cdot (Gr_z \cdot Pr_z)^{0,1}$ ; (9)

– для перехідного режиму  $Nu_z = 0,008 \cdot Re_z^{0,9} \cdot Pr_z^{0,43}$ ; (10)

– для турбулентного режиму  $Nu_z = 0,023 \cdot Re_z^{0,8} \cdot Pr_z^{0,4}$ . (11)

У рівняннях (9) – (11) визначальним лінійним розміром є внутрішній діаметр труб  $d_{вн}$ , а визначальною температурою є середня температура гарячого теплоносія  $t_z$ .

Рівняння тепловіддачі при кипінні рідин істотно розрізняються в залежності від виду термомеханічного режиму цього енергоємного гетерогенного процесу, що супроводжується фазовим перетворенням. У цьому випадку коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  можна виразити без прямого звернення до методів статистики через узагальнений критерій Нуссельта  $Nu^*$  і за допомогою модифікованого критерію Рейнольдса  $Re^*$  і критерію Прандтля  $Pr$  [7]:

$$Nu^* = C \cdot Re^{*n_1} \cdot Pr^{n_2}, \quad (12)$$

де  $C, n_1, n_2$  – постійні.

Також в умовах як вільного, так і вимушеного руху теплоносія можна використовувати перетворене рівняння (12), якому надають спрощений вигляд – більш зручний для визначення усередненого значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  через рушійну силу процесу  $\Delta T_{\text{кин}}$  [7]:

$$\alpha = b^3 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta T_{\text{кин}})^2}{\nu \cdot \sigma \cdot |T_{\text{кин}}|}. \quad (13)$$

У рівнянні (13) усі позначення відповідають позначенням рівнянь (5) – (8), а  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу, [Н/м].

Чисельне значення безрозмірною функції  $b$ , визначаємо з рівняння [7]:

$$b = 0,75 + 7,5 \cdot \left( \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{р}} - \rho_{\text{п}}} \right)^{2/3}, \quad (14)$$

де  $\rho_{\text{р}}, \rho_{\text{п}}$  – відповідно густини рідини і пари, кг/м<sup>3</sup>.

### 1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів

Загальний вигляд проектованого апарату (випарник з паровим простором типу ТП) представлений на рис. 2.

**Принцип роботи випарника полягає в наступному.** Через патрубок IV при температурі кипіння під абсолютним тиском 1,25 ат у міжтрубний простір випарника подається холодний теплоносій – бензол. При цьому через патрубок VI в розподільну камеру 7 надходить гарячий теплоносій – насичена водяна пара, яка при тиску 1,4 ат має температуру 109°C). За допомогою теплопередачі через стінку теплообмінних труб 4, відбувається активне випаровування бензолу. Відпрацьований водяна пара виводиться з апарату через патрубок V.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

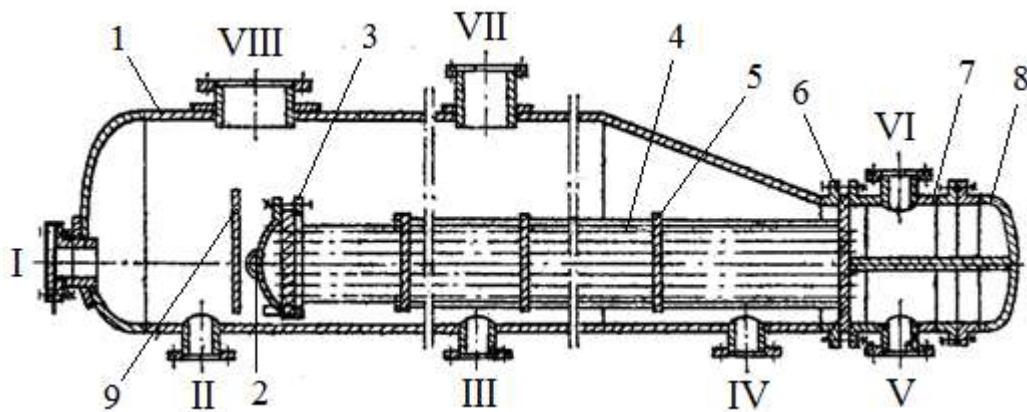


Рисунок 2 – Схема випарника з паровим простором типу ТП (виконання 1):

I – для монтажу пучка; II – вихід залишку продукту; III – дренаж; IV – вхід бензолу; V – вихід водяної пари (конденсату); VI – вхід водяної пари; VII – вихід парів бензолу; VIII – люк; 1 – кожух; 2 – плаваюча головка; 3 – рухома трубна решітка; 4 – теплообмінна труба; 5 – перегородка; 6 – нерухома трубна решітка; 7 – розподільна камера; 8 – кришка розподільчої камери

Утворені в результаті випаровування пари бензолу залишають апарат за допомогою патрубка VII. Рівень рідини у випарнику підтримується за допомогою переливної планки 9. Рідина, яка перевищила встановлений планкою рівень, виводиться за межі апарату за допомогою патрубка II. Перегородка 5 надає теплообмінним трубам жорсткість, запобігаючи їх провисанню.

Також для монтажних і ремонтних робіт в апараті передбачені люк VIII і спеціальний патрубок I.

Вибір конструктивних матеріалів для виготовлення апарату проводився на підставі [8–10]. Вибір матеріалу диктується в основному його корозійною стійкістю і теплопровідністю, причому конструкція теплообмінного апарату істотно залежить від властивостей вибраного матеріалу.

Матеріали для виготовлення кожухотрубного випарника з паровим простором вибираємо відповідно до специфіки його експлуатації, при цьому враховуємо можливу зміну вихідних фізико-хімічних властивостей матеріалів під впливом робочого середовища, температури і хіміко-технологічного процесу, що протікає.

Також слід враховувати:

- механічні властивості матеріалу – межа міцності, відносне подовження, твердість тощо;
- технологічність виготовлення (особливо зварюваність);
- хімічну стійкість проти роз’їдання;
- теплопровідність.

Вибір конструктивного матеріалу робимо, виходячи із його низької вартості і не дефіцитності, але щоб можна було забезпечити ефективну технологічність виготовлення.

Таким чином, на підставі вищезазначеного, для виготовлення корпусу, фланців, розподільних камер, а також деталей, які працюють під тиском раціонально використовувати сталь 16ГС. Фізико-механічні властивості сталі 16ГС приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні фізико-механічні властивості сталі 16ГС

Показник	Значення
Модуль пружності $E$ , МПа	200000
Модуль зсуву $G$ , МПа	77000
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	не менше 360
Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	не менше 180
Відносне звуження $\psi$ , %	56
Відносне подовження $\delta$ , %	25
Твердість по Брінеллю, НВ	115
Зварюваність	без обмежень

Для виготовлення теплообмінних труб, штуцерів, кріпільних деталей (болти, гайки, шпильки), панелей, кронштейнів, ребер жорсткості і т. ін. використовуємо сталь 20. Фізико-механічні властивості сталі 20 приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні фізико-механічні властивості сталі 20

Показник	Значення
Модуль пружності $E$ , МПа	200000
Модуль зсуву $G$ , МПа	74000
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	не менше 420
Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	не менше 250
Відносне звуження $\psi$ , %	40
Відносне подовження $\delta$ , %	16
Твердість по Брінеллю, НВ	156
Зварюваність	без обмежень, окрім хіміко-термічно оброблених деталей

Для виготовлення неметалевих прокладок для ущільнення роз'ємів фланцевих з'єднань апарата використовуємо пароніт – листовий прокладковий матеріал, що виготовляється пресуванням азбокаучукової маси, яка складається із азбесту, каучуку і порошкових інгредієнтів.



## 2 Технологічні розрахунки процесу і апарата

### 2.1 Технологічні розрахунки

Технологічний розрахунок починається із визначення основних теплофізичних властивостей теплоносіїв, а саме: щільності, динамічної в'язкості, теплоємності і теплопровідності [6, 7].

Вихідні дані до технологічного розрахунку апарата (кількість і технологічні параметри потоків, які входять у теплообмінний апарат і виходять з нього (у відповідності до рис. 2)), вказані у завданні до кваліфікаційної роботи.

Отже, згідно вихідних даних, бензол надходить у випарник вже у киплячому стані (температура кипіння при абсолютному тиску 1,25 ат становить 89°C [7]).

Тому теплове навантаження випарника у нашому випадку буде становити:

$$Q = Q_{исп} = G_x \cdot r_x, \quad (15)$$

де  $r_x$  – питома теплота пароутворення бензолу,  $r_x = 385 \cdot 10^3$  Дж/кг [12].

$$Q = Q_{исп} = \frac{3000}{3600} \cdot 385 = 320 \text{ (кВт)}.$$

Витрата гарячого теплоносія (водяної пари):

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 \cdot (t_{н2} - t_{к2})}, \quad (16)$$

де  $c_2$  – теплоємність водяної пари,  $c_2 = 2,17 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К) [12];

$t_{к2}$  – кінцева температура водяної пари.

Для наближених (навчальних) розрахунків орієнтовно приймають, що температура кипіння робочого тіла повинна бути на 5–6°C нижче середньої температури охолоджуваного теплоносія [13].

Таким чином, температура кипіння робочої речовини ректифікаційної установки фактично визначає тиск, при якому випаровується робоча речовина.

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Отже, за рекомендацією [13] приймаємо  $t_{к2} = 95^{\circ}\text{C}$ .

$$G_z = \frac{320}{2,17 \cdot (109 - 95)} = 10,5 \text{ (кг/с)}.$$

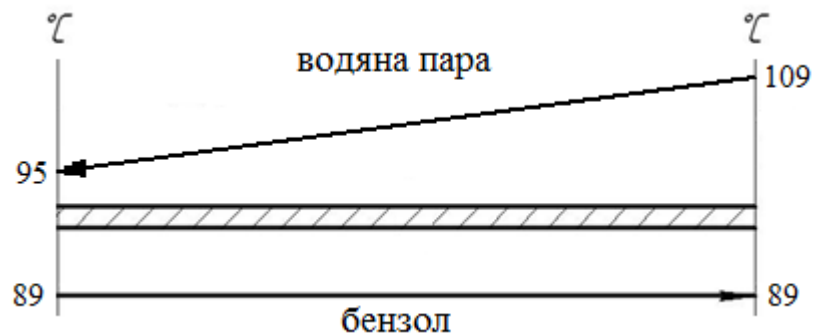


Рисунок 3 – Температурна схема процесу випаровування бензолу

Середню різницю температур визначаємо за рівнянням (3):

$$\Delta t_{cp} = \frac{20 - 6}{\ln\left(\frac{20}{6}\right)} = 12^{\circ}\text{C},$$

де більша різниця температур дорівнює  $\Delta t_B = 109 - 89 = 20^{\circ}\text{C}$ ;

менша різниця температур дорівнює  $\Delta t_M = 95 - 89 = 6^{\circ}\text{C}$ .

Попередньо, за рівнянням (1), розраховуємо поверхню теплопередачі:

$$F = \frac{320 \cdot 10^3}{450 \cdot 12} = 59 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Вибираємо стандартизований теплообмінник з такими характеристиками:

- поверхня теплообміну  $F = 62 \text{ м}^2$ ;
- внутрішній діаметр кожуха  $D = 1000 \text{ мм}$ ;
- довжина труб  $L = 6000 \text{ мм}$ ;
- сортамент труб  $\text{Ø}25 \times 2 \text{ мм}$ ;
- кількість трубних пучків 1;
- кількість труб у трубному пучку 132;
- площа прохідного перетину одного ходу по трубах  $s_{mp} = 23 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

Фактична швидкість руху водяної пари у трубах:

$$w_z = \frac{G_z}{\rho_z \cdot s_{mp} \cdot n}, \quad (17)$$

де  $\rho_z$  – густина водяної пари; при усередненій температурі  $\rho_z = 0,82 \text{ кг/м}^3$ ;

$n$  – число ходів по трубах; згідно із прийнятою конструкцією  $n = 2$ .

$$w_z = \frac{10,5}{0,82 \cdot 23 \cdot 10^{-2} \cdot 2} = 27,8 \text{ (м/с)}.$$

Враховуючи, що для водяної пари динамічний коефіцієнт в'язкості дорівнює  $\mu_z = 12,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_z = 2,48 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  і коефіцієнт об'ємного розширення теплоносія  $\beta_z = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$  визначаємо критерії:

– за рівнянням (6) – критерій Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{27,8 \cdot 0,021 \cdot 0,82}{12,4 \cdot 10^{-6}} = 38657.$$

– за рівнянням (7) – критерій Прандтля:

$$\text{Pr} = \frac{12,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,17 \cdot 10^3}{2,48 \cdot 10^{-2}} = 1,085.$$

За чисельним значенням критерію Рейнольдса можемо встановити, що режим руху водяної пари в трубах – турбулентний. Значить, для визначення критерію Нуссельта використовуємо рівняння (11):

$$\text{Nu}_z = 0,023 \cdot 38657^{0,8} \cdot 1,085^{0,4} = 131.$$

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_z$  визначаємо з рівняння (5):

$$\alpha_z = \frac{131 \cdot 0,248}{0,021} = 1547 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі зі сторони бензолу  $\alpha_x$  визначаємо з рівняння (13), попередньо розрахувавши за рівнянням (14) значення безрозмірної функції  $b$ :

$$b = 0,75 + 7,5 \cdot \left( \frac{6,8}{800 - 6,8} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,06.$$

Для бензолу:  $\nu_x = 0,138 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_x = 0,121 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\sigma_x = 0,019 \text{ Н}/\text{м}$ .

$$\alpha = 1,06 \cdot \frac{0,121^2 \cdot 99^2}{0,138 \cdot 0,019 \cdot 89} = 652 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Далі, за рівнянням (2), визначаємо реальний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{1547} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{652}} = 449,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

## 2.2 Конструктивні розрахунки

Розрахункова поверхня випарника складе:

$$F_p = \frac{320 \cdot 10^3}{449,8 \cdot 12} = 59 (\text{м}^2).$$

Запас поверхні:

$$\Delta = \frac{F - F_p}{F} \cdot 100\%, \quad (18)$$

$$\Delta = \frac{62 - 59}{62} \cdot 100\% = 5\%.$$

Як бачимо, запас поверхні забезпечується.

Остаточнo вибираємо випарник типу ТП з такими характеристиками:

- поверхня теплообміну  $F = 62 \text{ м}^2$ ;

- внутрішній діаметр кожуха  $D = 1000$  мм;
- довжина труб  $L = 6000$  мм;
- сортамент труб  $\varnothing 25 \times 2$  мм;
- кількість трубних пучків 1;
- кількість труб у трубному пучку 132;
- площа прохідного перетину одного ходу по трубах  $s_{mp} = 23 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

Діаметри штуцерів випарника для підведення-відведення теплоносіїв визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}, \quad (19)$$

де  $V$  і  $G$  – об'ємна і масова витрати рідини/пари відповідно,  $\text{м}^3/\text{с}$  і  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\rho$  – густина потоку середовища,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$w$  – швидкість витікання середовища,  $\text{м}/\text{с}$ .

Рекомендовані швидкості руху теплоносіїв [7]:

– для рідини 0,1–0,5  $\text{м}/\text{с}$  при самопливі і 0,5–2,5  $\text{м}/\text{с}$  в напірних трубопроводах;

– для пари або газу 5–25  $\text{м}/\text{с}$ .

Діаметр патрубку IV (рис. 2) для входу бензолу в апарат:

$$d_{x.вх} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3000 / 3600}{3,14 \cdot 800 \cdot 1,4}} = 0,031 (\text{м}).$$

Діаметр патрубку VII (рис. 2) для виходу парів бензолу:

$$d_{x.вих} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3000 / 3600}{3,14 \cdot 6,8 \cdot 15}} = 0,100 (\text{м}).$$

Діаметр патрубку VI (рис. 2) для входу водяної пари:

$$d_{\text{вх}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,5}{3,14 \cdot 0,8 \cdot 20}} = 0,098 (\text{м}).$$

Діаметр патрубка V (рис. 2) для виходу водяної пари:

$$d_{\text{вих}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,5}{3,14 \cdot 0,85 \cdot 20}} = 0,096 (\text{м}).$$

За отриманими значеннями приймаємо стандартні патрубки:

- для входу бензолу  $D_y = 32$  мм;
- для виходу парів бензолу  $D_y = 100$  мм;
- для входу водяної пари  $D_y = 100$  мм;
- для виходу водяної пари  $D_y = 100$  мм.

### 2.3 Гідравлічний опір апарата

Розрахунок гідравлічного опору випарника визначає кількість енергії, витраченої на рух теплоносіїв через апарат. Гідравлічний опір міжтрубного простору не визначаємо, оскільки, враховуючи невеликі швидкості теплоносія, його значення дуже маленьке [14].

Гідравлічний розрахунок проводимо у відповідності до методики, що викладена у [14].

Повний напір, необхідний для руху рідини або газу через теплообмінник, визначаємо за такою формулою:

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_{\text{ТР}} + \Sigma \Delta P_{\text{М}} + \Sigma \Delta P_{\text{У}} + \Sigma \Delta P_{\text{Г}}, \quad (20)$$

де  $\Sigma \Delta P_{\text{ТР}}$  – сума гідравлічних втрат на тертя, Па;

$\Sigma \Delta P_{\text{М}}$  – сума втрат напору в місцевих опорах, Па;

$\Sigma \Delta P_{\text{У}}$  – сума втрат напору, обумовлених прискоренням потоку, Па;

$\Sigma \Delta P_{\text{Г}}$  – перепад тиску для подолання стовпа рідини, Па.

Гідравлічні втрати на тертя в каналах при поздовжньому омиванні пучка труб теплообмінного апарату визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{TP} = \lambda_{TP} \cdot \frac{L}{d_E} \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (21)$$

де  $\lambda_{TP}$  – коефіцієнт опору тертя.

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_E} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (22)$$

де  $\Delta$  – абсолютна шорсткість поверхні труб, мм.

Для сталевих нових труб  $\Delta = 0,06\text{--}0,1$  мм, для сталевих труб, що були в експлуатації, з незначною корозією  $\Delta = 0,1\text{--}0,2$  мм.

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,1}{0,021} + \frac{68}{76380} \right)^{0,25} = 0,163.$$

$$\Delta P_{TP} = 0,163 \cdot \frac{6}{0,021} \cdot \frac{55^2 \cdot 0,82}{2} = 57760 \text{ (Па)}.$$

Гідравлічні втрати тиску в місцевих опорах визначаємо за формулою:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (23)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору. Його знаходять як суму опорів кожного елемента випарника:  $\xi = 2 \cdot \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$  (вхідна і вихідна камери  $\xi_1 = 1,5$ , вхід у труби  $\xi_2 = 0,5$  і вихід із них  $\xi_3 = 1$ , поворот на  $180^\circ$  між ходами  $\xi_4 = 1,4$  [14]).

$$\xi = 2 \cdot 1,5 + 0,5 + 1 + 1,4 = 5,9.$$

$$\Delta P_M = 5,9 \cdot \frac{55^2 \cdot 0,82}{2} = 7317 \text{ (Па)}.$$

Оскільки для крапельних рідин втрати тиску  $\Delta P_y$  мізерно малі, то вони в розрахунок не приймаються ( $\Delta P_y = 0$ ).

Перепад тиску для подолання гідростатичного стовпа рідини дорівнює нулю ( $\Delta P_r = 0$ ), оскільки випарник не сполучається із навколишнім середовищем.

Повний напір, необхідний для руху середовищ через апарат складе:

$$\Delta P = 57760 + 7317 = 65077 \text{ (Па)}.$$

## 2.4 Вибір допоміжного обладнання

**Розрахунок і вибір збірника для вихідної суміші.** Відповідно до технологічної схеми (рис. 1), вихідна суміш, яка надходить на установку для подальшого розділення, потрапляє у збірник-сховище (позиція 1).

За вихідними даними, витрата бензолу, що надходить в проєктований випарник, становить 3000 кг/год. Отже, приймаємо таке припущення, що продуктивність ректифікаційної установки в цілому за вихідною сумішшю становить 10000 кг/год. Ємність для зберігання вихідної суміші розраховуємо, виходячи з 6–8 годинного резерву робочого часу і з урахуванням коефіцієнта заповнення  $\psi = 0,8 \dots 0,85$ . Приймаємо  $\psi = 0,82$ .

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (24)$$

де  $G$  – загальна витрата суміші, кг/год.;

$\tau$  – резерв робочого часу,  $\tau = 7$  год.;

$\rho$  – густина вихідної суміші,  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ .

$$V_{EP} = \frac{10000 \cdot 7}{0,82 \cdot 800} = 106,7 \text{ м}^3.$$

Задаємося стандартизованим діаметром ємності  $D = 3,6 \text{ м}$ , тоді її висота складе:

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>24</b>



$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}, \quad (25)$$

$$H = \frac{106,7}{0,785 \cdot 3,6^2} = 10,5 \text{ м.}$$

**Розрахунок і вибір насоса для подачі вихідної суміші в колону** (рис. 1, поз. 2). Для всмоктуючого і нагнітального трубопроводів приймемо однакову швидкість плинину рідини, що дорівнює  $w = 2 \text{ м/с}$ .

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (26)$$

де  $V$  – об’ємна витрата вихідної суміші,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$$d = \sqrt{\frac{3,47 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,047 \approx 0,050 \text{ м.}$$

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}, \quad (27)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,050 \cdot 800}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 320000,$$

тобто режим турбулентний. Абсолютну шорсткість трубопроводу приймаємо  $\Delta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Тоді

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,050} = 0,004.$$

Далі отримаємо:

$$\frac{1}{e} = 250; \quad 560 \cdot \frac{1}{e} = 140000; \quad 10 \cdot \frac{1}{e} = 2500;$$

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>25</b>

$$Re > 560 \cdot \frac{1}{e}.$$

Для зони, автомодельної по відношенню до  $Re$ :

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}, \quad (28)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,004^{0,25} = 0,028.$$

Далі визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої і нагнітальної ліній.

Для всмоктуючої лінії:

1) вхід у трубу (приймаємо з гострими краями)  $\xi_1 = 0,5$ ;

2) 2 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 2 \cdot 1,1 = 2,2$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2;$$

$$\Sigma \xi = 0,5 + 2,2 = 2,7.$$

Для нагнітальної лінії:

1) вентиля прямоточні, 2 шт.  $\xi_1 = 2 \cdot 0,65 = 1,3$ ;

2) 3 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$ ;

3) вихід із труби  $\xi_3 = 1$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3;$$

$$\Sigma \xi = 1,3 + 3,3 + 1 = 5,6.$$

Втрачений напір у всмоктуючій лінії знаходимо за формулою:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (29)$$

де  $l, d_E$  – відповідно довжина і еквівалентний діаметр трубопроводу.

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>26</b>

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,028 \cdot \frac{8}{0,050} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,46 \text{ м.}$$

Втрачений напір в нагнітальній лінії знаходимо за формулою (29):

$$h_{П.НАГ.} = \left( 0,028 \cdot \frac{12}{0,050} + 5,6 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,51 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАГ.}, \quad (30)$$

$$h_{П} = 1,46 + 2,51 = 3,97 \text{ м.}$$

Знаходимо напір насоса за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_{Г} + h_{П}, \quad (31)$$

де  $(P_2 - P_1)$  – різниця тисків в апараті і в ємності, із якої подається рідина;

$H_{Г}$  – геометрична висота підйому рідини.

$$H = \frac{0,1}{800 \cdot 9,81} + 6 + 3,97 = 10,0 \text{ м.}$$

Корисну потужність насоса визначаємо за рівнянням:

$$N_{П} = \rho_p \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (32)$$

де  $Q$  – подача (витрата),  $Q = 3,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – напір насоса.

$$N_{П} = 800 \cdot 9,81 \cdot 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot 10,0 = 272 \text{ Вт.}$$

Потужність, яку повинен розвивати електродвигун насоса на вихідному валу при сталому режимі роботи:

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{н}}}, \quad (33)$$

де  $\eta_{\text{н}}, \eta_{\text{пер}}$  – коефіцієнти корисної дії відповідно насоса і передачі від електродвигуна до насоса. Приймаємо  $\eta_{\text{н}} = 0,6$  і  $\eta_{\text{пер}} = 1$ .

Отримуємо:

$$N = \frac{272}{1 \cdot 0,6} = 454 \text{ Вт.}$$

Вибираємо відцентровий насос марки ЦНС 13-18 з такими параметрами:

- об'ємна подача насоса 13 м<sup>3</sup>/год.;
- напір насоса 18 м;
- потужність, споживана насосом 2,5 кВт;
- частота обертання 2200 об/хв.

### 3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

#### 3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки

Розрахунок проводимо відповідно до методики, що викладена у [15]. Приймаємо робочий тиск у міжтрубному просторі 0,125 МПа.

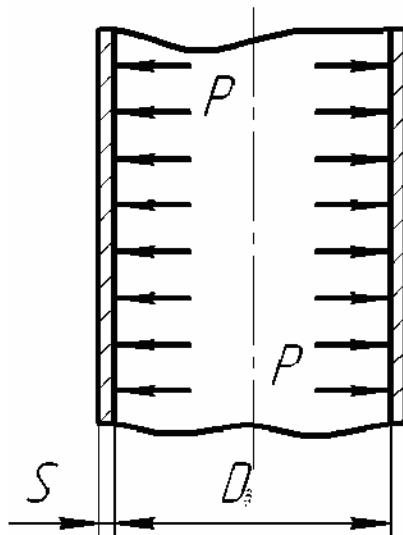


Рисунок 4 – Розрахункова схема циліндричної обичайки

Знаходимо величину нормативної допустимого напруження для сталі 16ГС при розрахунковій температурі 89°C:  $\sigma^* = 202$  МПа.

Допустиме напруження:

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \quad (34)$$

де  $\eta = 1$  – поправковий коефіцієнт для листового прокату.

$$[\sigma] = 202 \cdot 1 = 202 \text{ МПа}.$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях:

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1}, \quad (35)$$

де  $\sigma_T^{20} = 280$  МПа – межа плинності сталі 16ГС при температурі 20°C.

$$[\sigma]_{II} = \frac{280}{1,1} = 254,5 \text{ МПа}.$$

Далі визначаємо розрахунковий тиск:

$$P_p = P + P_r, \quad (36)$$

де  $P = 0,125$  МПа – робочий тиск;

$P_r$  – гідростатичний тиск середовища.

Гідростатичний тиск середовища:

$$P_r = g \cdot \rho_p \cdot H_p; \quad (37)$$

$$P_r = 9,81 \cdot 850 \cdot 0,6 = 0,005 \text{ МПа};$$

$$P_p = 0,125 + 0,005 = 0,13 \text{ МПа}.$$

Оскільки розрахунковий тиск менше 0,5 МПа, то пробний тиск при гідрравлічних випробуваннях визначаємо за рівнянням:

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]}, 0,2 \right\}, \quad (38)$$

де  $[\sigma]_{20} = \sigma_{20}^* = 196$  МПа – допустиме напруження сталі 16ГС при температурі 20°C.

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot 0,13 \cdot 196}{202} = 0,19 \text{ МПа}, 0,2 \text{ МПа} \right\} = 0,2 \text{ МПа}.$$

Розрахункова товщина циліндричної обичайки:

$$S_p^II = \max \left\{ \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{II} - P_{II}} \right\}, \quad (39)$$

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>30</b>

де  $\varphi = 1$  – коефіцієнт міцності зварних швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичним або напівавтоматичним зварюванням.

$$S_p^H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,13 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 202 - 0,13} = 0,32 \text{ мм} \\ \frac{0,2 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 254,4 - 0,2} = 0,4 \text{ мм} \end{array} \right\} = 0,4 \text{ мм} .$$

Виконавча товщина циліндричної обичайки:

$$S_{\text{ц}} \geq S_p^H + c , \quad (40)$$

де  $c$  – прибавка до розрахункових товщин конструктивних елементів:

$$c = c_1 + c_2 + c_3 , \quad (41)$$

$c_1$  – прибавка для компенсації корозії та ерозії;

$c_2$  – прибавка для компенсації мінусового допуску;

$c_3$  – технологічна прибавка.

Приймаємо, що  $c_2 = c_3 = 0$ . Прибавку для компенсації корозії та ерозії визначаємо за рівнянням:

$$c_1 = \Pi \cdot \tau , \quad (42)$$

де  $\Pi = 0,12$  мм/рік – проникність матеріалу;

$\tau = 15$  років – термін роботи апарата.

$$c = c_1 = 0,12 \cdot 15 = 1,8 \text{ мм} ;$$

$$S_{\text{ц}} = 0,4 + 1,8 = 2,2 \text{ мм} .$$

Приймаємо  $S_{\text{ц}} = 4 \text{ мм} .$

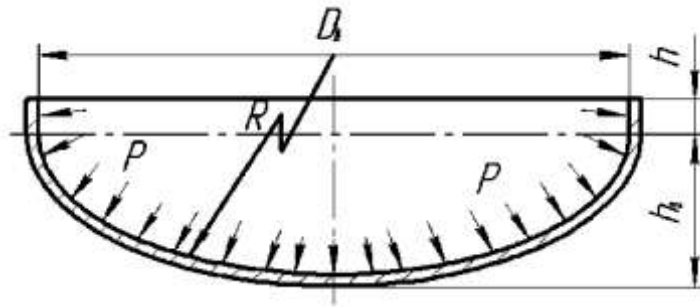


Рисунок 5 – Розрахункова схема еліптичного днища

Розрахункова товщина еліптичного днища:

$$S_P^E = \max \left\{ \frac{P_P \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_P}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma]_{II} - 0,5 \cdot P_{II}} \right\}, \quad (43)$$

$$S_P^E = \max \left\{ \frac{0,13 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 202 - 0,5 \cdot 0,13} = 0,32 \text{ мм}, \frac{0,2 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 254,4 - 0,5 \cdot 0,2} = 0,4 \text{ мм} \right\} = 0,4 \text{ мм}.$$

Виконавча товщина еліптичного днища:

$$S_E \geq S_P^E + c, \quad (44)$$

$$S_E = 0,4 + 1,8 = 2,2 \text{ мм}.$$

Приймаємо  $S_E = 4 \text{ мм}$ .

### 3.2 Розрахунок опори апарата

Знаходимо масу обичайки кожуха:

$$m_k = \left[ \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot S_{II})^2}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot H \cdot \rho, \quad (45)$$

де  $\rho$  – щільність сталі;  $\rho = 7890 \text{ кг/м}^3$ .



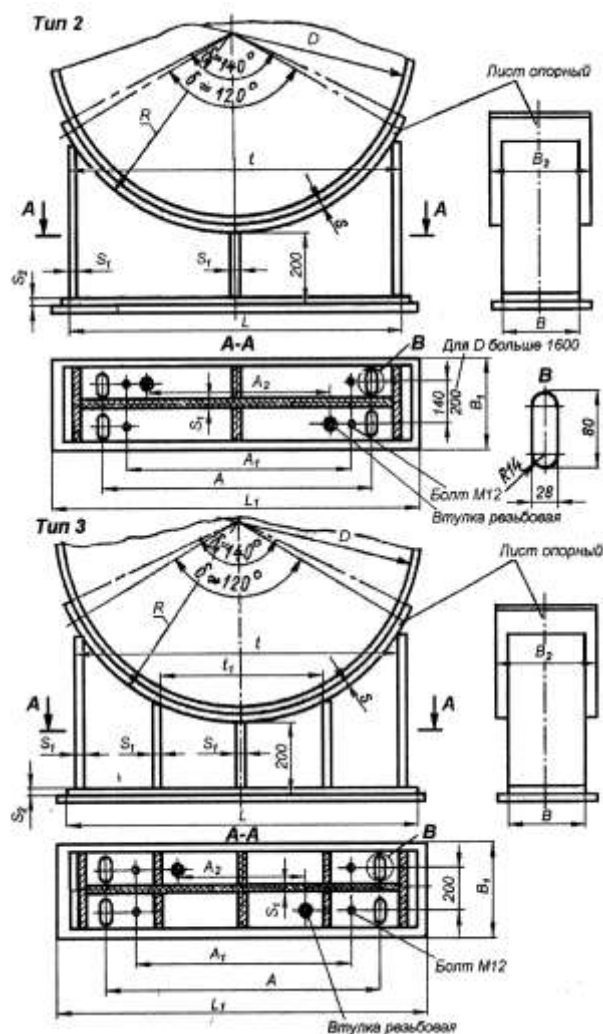


Рисунок 6 – Конструктивна схема стандартних сидлових опор

$$m_k = \left[ \frac{3,14 \cdot (1 + 2 \cdot 0,004)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} \right] \cdot 6 \cdot 7890 = 597 \text{ (кг)}.$$

Маса еліптичного днища і кришки відповідно (згідно [15]):

$$m_E = 1,24 \cdot D^2 \cdot S_E \cdot \rho, \quad (46)$$

$$m_{E_{дн}} = 1,24 \cdot 1^2 \cdot 0,004 \cdot 7890 = 39 \text{ (кг)};$$

$$m_{E_{кр}} = 1,24 \cdot 0,6^2 \cdot 0,004 \cdot 7890 = 14,1 \text{ (кг)}.$$

Маса труб:

$$m_{тр} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{вн}^2) \cdot H \cdot n \cdot \rho, \quad (47)$$

$$m_{mp} = \frac{3,14}{4} \cdot (0,025^2 - 0,021^2) \cdot 6 \cdot 132 \cdot 7890 = 903 \text{ (кг)}.$$

Маса фланця з решіткою:

$$m_{\phi} = \frac{\pi \cdot D_{\phi}^2}{4} \cdot h_{\phi} \cdot \rho, \quad (48)$$

де  $D_{\phi}$  – зовнішній діаметр фланця, м;

$h_{\phi}$  – висота фланця, м.

$$m_{\phi} = \frac{3,14 \cdot 0,61^2}{4} \cdot 0,06 \cdot 7890 = 138 \text{ (кг)}.$$

Об'єм міжтрубного простору:

$$V_{mtp} = f_{mtp} \cdot H, \quad (49)$$

$$V_{mtp} = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ (м}^3\text{)}.$$

При коефіцієнті заповнення  $\varphi=0,5$  маса бензолу в апараті складе:

$$m_x = V_{mtp} \cdot \rho_x \cdot \varphi, \quad (50)$$

$$m_x = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,5 = 480 \text{ (кг)}.$$

Сила тяжіння апарату в робочому стані:

$$G = g \cdot (m_k + m_{\text{Эдн}} + m_{\text{Экр}} + m_{mp} + m_{\phi} + m_x); \quad (51)$$

$$G = 9,81 \cdot (597 + 39 + 14,1 + 903 + 138 + 480) = 21300 \text{ (Н)}.$$

Приймаємо кількість опор  $n = 2$  шт.

Навантаження на одну опору складе:

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>34</b>

$$Q = \frac{G}{n}; \quad (52)$$

$$Q = \frac{21300}{2} = 10650 \text{ (H)}.$$

Остаточно приймаємо стандартну сідлову опору 400-514-2-П, конструктивні розміри якої (умовні позначення див. рис. 6):  $D = 1000 \text{ мм}$ ;  $R = 514 \text{ мм}$ ;  $S_1 = 8 \text{ мм}$ ;  $S_2 = 14 \text{ мм}$ ;  $L = 1000$ ;  $A = 650 \text{ мм}$ ;  $A_1 = 550 \text{ мм}$ ;  $A_2 = 400 \text{ мм}$ ;  $l = 980 \text{ мм}$ ;  $B = 250 \text{ мм}$ ;  $L_1 = 1020 \text{ мм}$ ; втулка для опори М48;  $S = 6 \text{ мм}$ ;  $B_2 = 360 \text{ мм}$ .

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>35</b>

## 4 Монтаж та ремонт апарата

### 4.1 Монтаж розробленого апарата [16]

Випарник бензолу з паровим простором відноситься до кожухотрубних теплообмінників. Технологія монтажу апаратів такої конструкції залежить від місця і способу їх установки. Вони можуть бути встановлені на відкритому майданчику, на постаменті чи в середині будівлі, а також горизонтально чи вертикально.

У нашому випадку мова йде про горизонтальний апарат, який розміщений на відкритому майданчику на нульовій позначці. Фундаменти виконують у вигляді двох залізобетонних стовпів з анкерними болтами під опори. При монтажі встановлюють нерухому і рухому опори. Гайки на болтах не закручують повністю (залишають зазор 1–2 мм), щоб апарат міг вільно переміщуватись в горизонтальному напрямку. При установці опор, які мають змогу переміщуватися, перевіряють рівномірність прилягання ковзаник до опорних поверхонь і їх перпендикулярність осі апарата. Горизонтальність апарату перевіряють за рівнеміром.

У деяких випадках при монтажі проводять контрольне розбирання (ревізію) кожухотрубних теплообмінників. При цьому перевіряють наявність прокладок, комплектність знімних деталей, правильність їх взаємного розташування.

Для виявлення дефектів у розвальцьовуванні і обварці трубок трубний пучок спресовують (при знятій розподільній камері і кришці) шляхом подачі води в міжтрубний простір. При цьому також оглядають корпус теплообмінника. Дефекти розвальцьовування або обварки усувають.

Горизонтальне обладнання монтують за допомогою одного або двох (спарених) кранів. Спосіб підйому і вантажопідйомність кранів вибирають в залежності від розміру і маси обладнання, висоти і конфігурації фундаменту або постаменту під обладнання, наявності розташованих поруч будівельних конструкцій та ін.

Горизонтальні апарати особливо великої маси і при підйомі на значну висоту часто монтують за допомогою двох кранів. Монтаж починають з підйому апарата із вихідного горизонтального положення без відриву його від землі. На рис. 7 показані найбільш сприятливі умови роботи кранів при монтажі апаратів.

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>36</b>

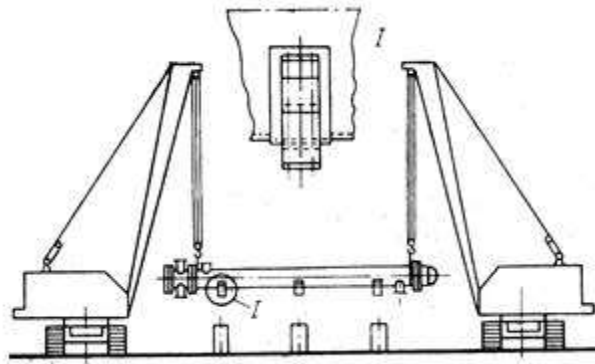


Рисунок 7 – Схема монтажу горизонтального теплообмінника  
за допомогою двох кранів

Коли установка одного з кранів із зовнішньої сторони фундаментів неможлива, монтаж апаратів виконують лише маневруванням стріли крана. У тих випадках, коли при підйомі апаратів неможливо розташувати крани із зовнішньої сторони фундаментів і проїхати між фундаментами, збільшують виліт стріли кранів або переміщують крани з піднятим апаратом у межах їх вантажної характеристики.

#### 4.2 Ремонт апарата [16]

Теплообмінники із трубною системою мають підвищену надійність, що дозволяє їм функціонувати без збоїв протягом довгих років. Але не варто забувати, що планове технічне обслуговування просто необхідне для профілактики поломок. Циркулюючий теплоносій з часом засмічує стінки трубок, осідаючи на їх поверхні та перешкоджаючи вільному потоку. Уникнути передчасного виходу обладнання із ладу та зберегти ефективність дозволить регулярне очищення трубчатки. Завдяки систематичному промиванню є можливість тривалий час підтримувати робочі параметри у нормі. Безпосередньо ремонт кожухотрубних теплообмінників, у більшості випадків, необхідний лише у разі надмірного зношення обладнання.

Найбільш поширеними дефектами поламаних теплообмінників є наступні:

##### 1. Виривання трубок із трубних решіток.

Дана проблема зазвичай виникає через нерівномірне розширення трубок та корпусу. Варіанти вирішення:

- зачистка місця розриву і обварювання трубки заново;

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>37</b>

- висвердлювання трубки і установка нової трубки;
- зачистка і заглушка трубки.

Якщо встановлюються заглушки на дефектні трубки, необхідно враховувати, що опір даної ділянки зростає, а також трохи погіршується теплообмін. Зазвичай, теплообмінники розраховують таким чином, щоб без сильного впливу на технологічний процес можна було загнушити до 10 % трубок. У кожному разі це питання треба вивчати окремо.

## **2. Наскрізна корозія трубок.**

Дана проблема виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при неправильно підібраному матеріалі трубчатки. Варіанти вирішення:

- висвердлювання трубки і установка нової трубки;
- зачистка і заглушка трубки.

Так само, як і в описаному вище випадку, при встановленні загнушок необхідно дотримуватись вимог з урахуванням збільшеного опору. Із огляду на причини виникнення наскрізної корозії, можна припустити, що із великою ймовірністю, найближчим часом можуть почати виходити із ладу іншу трубки.

Нерідко при виникненні наскрізної корозії найбільш ефективним шляхом є просто заміна трубного пучка (виготовлення нового трубного пучка). Це особливо актуально, якщо повторний дефект виник швидко після першої поломки.

## **3. Наскрізна корозія корпусу чи камери.**

Дана проблема, так само як і наскрізна корозія трубок, зазвичай виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при неправильно підібраному матеріалі. Варіанти вирішення:

- підварювання або установка заплатки;
- виготовлення нової камери чи корпусу.

## **4. Засмічення трубок чи міжтрубного простору.**

Ця проблема може виникнути в тому випадку, якщо один із теплоносіїв не фільтрується належним чином, або якщо відбувається поява природного нагару (наприклад, при роботі з вихлопними газами).

Варіанти вирішення:

- механічне очищення;
- хімічне очищення.

Якщо засмічення відбувається через відсутність належної фільтрації середовищ, рекомендується установка необхідних фільтрів. Якщо ж відбувається поява нагару, швидше за все, це обумовлено технологічними моментами. У такому випадку треба визначати, коли відбувається чергове засмічення теплообмінника (вимірювання температури або протитиску) і чистити його.

Подібні роботи слід проводити на місці експлуатації. У разі необхідності фахівці повинні виїхати на місце і провести цю роботу, але в більшості випадків ці операції виробляє експлуатаційний персонал.

## **5. Покриття вапном (накипом) чи іншими відкладеннями.**

Ця проблема може виникнути в тому випадку, якщо один з теплоносіїв є рідина (вода) з невідповідним для даного процесу хімічним складом (наприклад, надмірно мінералізована). Варіанти вирішення: очистка за допомогою спеціальних хімічних засобів.

У разі появи великого шару мінеральних відкладень (накипу) хімічне очищення може бути неефективним. У такому випадку трубний пучок не підлягатиме ремонту і буде необхідно виготовити новий трубний пучок.

Дефектні штуцера і трубні решітки при досягненні максимальних величин зносу і прогину замінюються.

Свищі і тріщини усуваються шляхом заварки або постановкою накладок з попереднім видаленням дефектної ділянки.

За допомогою кольорової дефектоскопії визначають протяжність і положення кінців тріщин, виявлених в корпусі. Ці кінці до заварки засвердлюють свердлами діаметром 3–4 мм. Некрізні тріщини глибиною не більше 0,4 товщини стінки розправляються під заварку односторонньою вирубкою на максимальну

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>39</b>

глибину тріщини зі зняттям крайок під кутом 50– 60°. При тріщині понад 100 мм зварювання проводять оберненоступеневим методом. Наскрізні і некрізні тріщини глибиною більше 0,4 товщини стінки обробляють на всю товщину вирубкою зубилом або газорізкою. При появі гніздових тріщин пошкоджені місця вирізають і закривають латками без гострих кутів. Латки вваривать в рівень з основним металом. Площа латки не повинна перевищувати площі листа апарату.

Надійність ліквідації поверхневих дефектів контролюють магнітною або ультразвуковою дефектоскопією. Допускається глибина пошкодження в межах 10–20 % товщини стінки в залежності від розмірів ушкодження.

Усі поверхні ущільнювачів слід контролювати магнітною або ультразвуковою дефектоскопією на відсутність тріщин. Після ремонту конденсатора його піддають гідравлічним або пневматичним випробуванням.

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40



## 5 Охорона праці

**Навчання працівників безпечних способів праці. Зміст та види інструктажів, хто і коли їх проводить [17, 18].**

Згідно зі статтею 18 Закону України «Про охорону праці» працівники під час прийняття на роботу і у процесі роботи повинні проходити за рахунок роботодавця навчання та інструктаж з охорони праці. Порядок проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці визначається Типовим положенням про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (далі – Типове положення), затвердженим наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 р. № 15.

Типове положення встановлює порядок навчання та перевірки знань з питань охорони праці посадових осіб та інших працівників у процесі трудової діяльності, а також учнів, курсантів, слухачів та студентів навчальних закладів під час трудового і професійного навчання.

Типове положення спрямоване на реалізацію в Україні системи безперервного навчання з питань охорони праці посадових осіб та інших працівників, надання першої медичної допомоги потерпілим від нещасних випадків і правил поведінки у разі виникнення аварій.

Працівники під час прийняття на роботу і у процесі роботи, а також учні, курсанти, слухачі та студенти під час трудового і професійного навчання проходять на підприємстві за рахунок роботодавця інструктажі, навчання та перевірку знань з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також правил поведінки у разі виникнення аварії. На підприємствах на основі Типового положення, з урахуванням специфіки виробництва та вимог нормативно-правових актів з охорони праці, розробляються і затверджуються наказами керівників відповідні положення підприємств про навчання та перевірку знань з охорони праці, а також формуються плани-графіки проведення навчання та перевірки знань з питань охорони праці, з якими мають бути ознайомлені працівники.

Організацію навчання та перевірки знань з питань охорони праці працівників, у тому числі під час професійної підготовки, перепідготовки та підвищення

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>41</b>

кваліфікації на підприємстві здійснюють працівники служби кадрів або інші спеціалісти, яким роботодавцем доручена організація цієї роботи.

Навчання з питань охорони праці у частині організації навчального процесу (формування навчальних груп, розробка навчально-тематичних планів та програм, форм навчальної документації та порядок їх ведення тощо) здійснюється відповідно до вимог законодавства та нормативно-правових актів у галузі освіти.

Навчання з питань охорони праці може проводитись як традиційними методами, так і з використанням сучасних видів навчання – модульного, дистанційного тощо, а також з використанням технічних засобів навчання: аудіовізуальних, комп'ютерних навчально-контрольних систем, комп'ютерних тренажерів [17].

Працівники, під час прийняття на роботу та періодично, повинні проходити на підприємстві інструктажі з питань охорони праці, надання першої медичної допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці (далі – інструктажі) поділяються на:

- 1) вступний;
- 2) первинний;
- 3) повторний;
- 4) позаплановий;
- 5) цільовий.

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження трудового або професійного навчання;
- з екскурсантами у разі екскурсії на підприємство.

Вступний інструктаж проводиться спеціалістом служби охорони праці або іншим фахівцем відповідно до наказу (розпорядження) по підприємству, який в установленому Типовим положенням порядку пройшов навчання і перевірку знань з питань охорони праці. Вступний інструктаж проводиться в кабінеті охорони праці або в приміщенні, що спеціально для цього обладнано, з використанням сучасних технічних засобів навчання, навчальних та наочних посібників за програмою, розробленою службою охорони праці з урахуванням особливостей виробництва. Програма та тривалість інструктажу затверджуються керівником підприємства. Запис про проведення вступного інструктажу робиться в журналі реєстрації вступного інструктажу з питань охорони праці (додаток 5), який зберігається службою охорони праці або працівником, що відповідає за проведення вступного інструктажу, а також у наказі про прийняття працівника на роботу.

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство або до фізичної особи, яка використовує найману працю;
- який переводиться з одного структурного підрозділу підприємства до іншого;
- який виконуватиме нову для нього роботу;
- відрядженим працівником іншого підприємства, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві.

Проводиться з учнями, курсантами, слухачами та студентами навчальних закладів: до початку трудового або професійного навчання; перед виконанням кожного навчального завдання, пов'язаного з використанням різних механізмів, інструментів, матеріалів тощо.

Первинний інструктаж на робочому місці проводиться індивідуально або з групою осіб одного фаху за діючими на підприємстві інструкціями з охорони праці відповідно до виконуваних робіт.

Повторний інструктаж проводиться на робочому місці індивідуально з окремим працівником або групою працівників, які виконують однотипні роботи, за обсягом і змістом переліку питань первинного інструктажу. Повторний інстру-

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>43</b>

ктаж проводиться в терміни, визначені нормативноправовими актами з охорони праці, які діють у галузі, або роботодавцем (фізичною особою, яка використовує найману працю) з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше: на роботах з підвищеною небезпекою – 1 раз на 3 місяці; для решти робіт – 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативно-правових актів з охорони праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативно-правових актів з охорони праці, що призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів – для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт – понад 60 днів.

Позаплановий інструктаж з учнями, студентами, курсантами, слухачами проводиться під час проведення трудового і професійного навчання при порушеннях ними вимог нормативно-правових актів з охорони праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо.

Позаплановий інструктаж може проводитись індивідуально з окремим працівником або з групою працівників одного фаху. Обсяг і зміст позапланового інструктажу визначаються в кожному окремому випадку залежно від причин і обставин, що спричинили потребу його проведення.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при ліквідації аварії або стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які відповідно до законодавства оформлюються наряд-допуск, наказ або розпорядження.

Цільовий інструктаж проводиться індивідуально з окремим працівником або з групою працівників. Обсяг і зміст цільового інструктажу визначаються залежно від виду робіт, що виконуватимуться.

Цільовий інструктаж проводиться з студентами в разі організації масових заходів (екскурсії, походи, спортивні заходи).

Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі проводить безпосередній керівник робіт (начальник структурного підрозділу, майстер) або фізична особа, яка використовує найману працю.

Первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктажі завершуються перевіркою знань у вигляді усного опитування або за допомогою технічних засобів, а також перевіркою набутих навичок безпечних методів праці, особою, яка проводила інструктаж.

При незадовільних результатах перевірки знань, умінь і навичок щодо безпечного виконання робіт після первинного, повторного чи позапланового інструктажів протягом 10 днів додатково проводяться інструктаж і повторна перевірка знань. При незадовільних результатах перевірки знань після цільового інструктажу допуск до виконання робіт не надається. Повторна перевірка знань при цьому не дозволяється.

Про проведення первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів та їх допуск до роботи особа, яка проводила інструктаж, уносить запис до журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці на робочому місці (додаток 6). Сторінки журналу реєстрації інструктажів повинні бути пронумеровані, прошнуровані і скріплені печаткою. У разі виконання робіт, що потребують оформлення наряду-допуску, цільовий інструктаж реєструється в цьому наряді-допуску, а в журналі реєстрації інструктажів - не обов'язково.

Перелік професій та посад працівників, які звільняються від повторного інструктажу, затверджується роботодавцем. До цього переліку можуть бути зараховані працівники, участь у виробничому процесі яких не пов'язана із безпосереднім обслуговуванням об'єктів, машин, механізмів, устаткування, застосуванням приладів та інструментів, збереженням або переробкою сировини, матеріалів тощо [18].

## Список літератури

1. Дистанційний курс «Процеси та апарати хімічних виробництв». Тема 19. Сучасні конструкції теплообмінного обладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266093/index.html>.
2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 32 с.
3. Маньковский О. Н. Теплообменная аппаратура химических производств: Инженерные методы расчета / О. Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. – Ленинград : Химия, 1976. – 368 с.
4. Методичні вказівки та контрольні завдання для самостійної роботи з дисципліни «Процеси та апарати хімічних виробництв (частина 1)» / укладачі: Я.Е. Михайловський, М.П. Юхименко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 61 с.
5. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1972. – 494 с.
6. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
7. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.
8. Лащинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
9. Лащинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лащинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
10. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. – Под общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.

11. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

12. Врагов А. П. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: Навчальний посібник / А. П. Врагов, Я. Е. Михайловський, С. І. Якушко. – За ред. А. П. Врагова. – Суми : Вид-во Сум-ДУ, 2008. – 170 с.

13. Дячек П.И. Холодильные машины и установки: Учебное пособие / П.И. Дячек. – Ростов на Дону : Феникс, 2007. – 424 с.

14. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.

15. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : Учеб. пособие для студентов вузов / М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А. И. Мильченко [и др.]. – Под общ. ред. Михалева М. Ф. – Л. : Машиностроение, 1984. – 301 с.

16. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов / С. А. Фарамазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 312 с.

17. Рогач І.М. Охорона праці в лікувально-профілактичних та санаторних закладах : Навчально-методичний посібник / І.М. Рогач, Р.І. Шніцер, С.П. Козодаєв. – Ужгород : Ужгородський національний університет, 2011. – 38 с.

18. Курс «Охорона праці». Тема 5. Навчання з питань охорони праці [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ztec.com.ua/ztec/e-lib/Охорона%20праці/Тема%205%20Навчання%20з%20питань%20ОП.pdf>.